T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ひずみ時効による鉄筋の特性変化の予測式の構築 その 2 予測式の構築および検証
Title(English)	Prediction model for changes in reinforcement properties due to strain ageing (Part2: Prediction model development and verification)
著者(和文)	岡村光晋, Alex Shegay, 佐藤 大樹
Authors(English)	Koshin Okamura, Alex Shegay, Daiki Sato
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 13-14
Citation(English)	, , , pp. 13-14
発行日 / Pub. date	2023, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

日本建築学会大会学術講演梗概集
（近畿） 2023 年 9 月

ひずみ時効による鉄筋の特性変化の予測式の構築
その 2　予測式の構築および検証

ひずみ時効　鉄筋　補修　予測モデル

正会員　○岡村光晋*1　正会員　Alex Shegay*2
正会員　佐藤 大樹*3

1. 序論

本報その 1 では，ひずみ時効による鉄筋の延性低下や強度上昇に影響を及ぼす因子を特定するための実験について記述した．本報その 2 では，本報その 1 で挙げられた因子を用いてひずみ時効による鉄筋の特性変化の予測式の構築を行う．

2. ひずみ時効による特性変化の定量的な定義

予測式の構築にあたって延性，最大引張強度および降伏強度（本報では 0.2 %オフセット耐力を用いた）の変化を定量的に評価するために使用した延性変化率 β_R ，最大引張強度変化率 β_B および降伏強度変化率 β_Y の定義をそれぞれ式(1)，(2)，(3)に示す．これはそれぞれひずみ時効が発生しなかった時の特性に対してひずみ時効による特性変化の割合を示している．なお，ε'_R ，σ'_B および σ_y はそれぞれひずみ時効なし引張時の延性，最大引張強度および降伏強度を示す．$\Delta\varepsilon_R$ ，$\Delta\sigma_B$ および $\Delta\sigma_A$ はそれぞれひずみ時効の有無による延性の変化，最大引張強度の変化および降伏強度の変化を示す(詳細はその 1 の図 1 参照)．

$$\beta_R = \Delta\varepsilon_R/\varepsilon'_R \quad (1)$$

$$\beta_B = \Delta\sigma_B/\sigma'_B \quad (2)$$

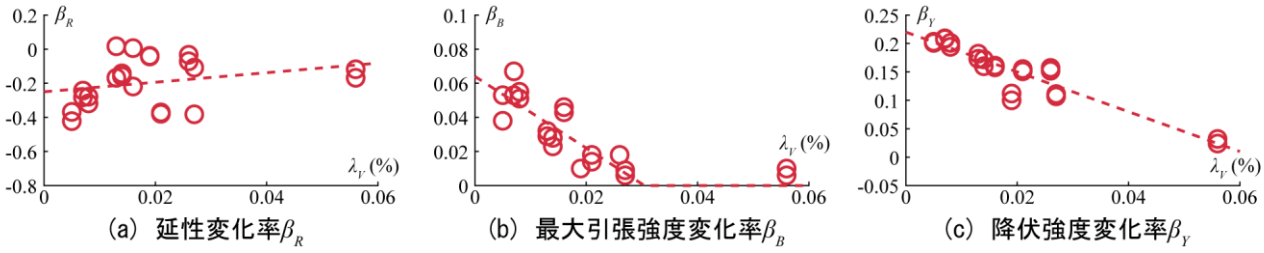
$$\beta_Y = \Delta\sigma_Y/\sigma_y \quad (3)$$

3. ひずみ時効による特性変化の予測式構築

本報その 1 ではひずみ時効による延性の低下および強度の上昇に影響を及ぼす因子としてバナジウム含有率 λ_V ，時効期間 t_A および予ひずみ ε_o が挙げられることを確認した．ここではこれら 3 因子について，それぞれの特性変化の予測式を構築した後にそれらを組み合わせることで一般的な特性変化の予測式を構築する．

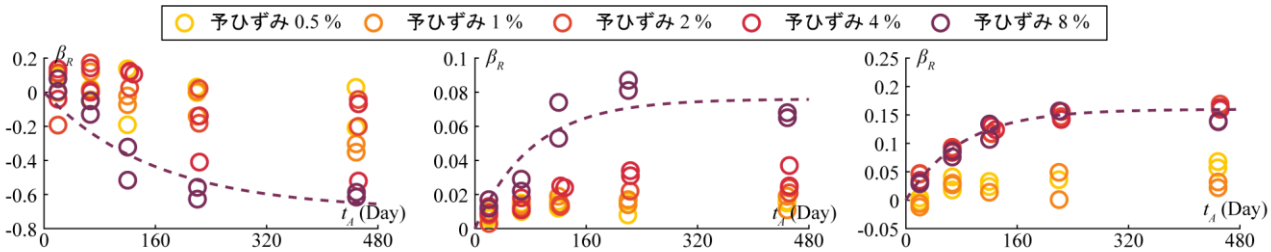
λ_V に対する延性変化率 β_R ，最大引張強度変化率 β_B および降伏強度変化率 β_Y の関係を図 1，t_A に対する特性変化 β_R ，β_B および β_Y の関係に ε_o を凡例としたものを図 2 の散布図部分にそれぞれ示す．図 1 よりこれら特性変化は線形とみられる関係を持ち，λ_V がある一定の値を超えるとひずみ時効が発生しないことが確認できる．また図 2 より特性変化は 0 を始点に t_A の経過ごとに上昇しつつある値へ収束すること，ε_o の上昇に従い延性低下および強度上昇が大きくなることが確認できる．また，t_A が 1 年間のものは収束値に十分に近いことが見て取れる．

以上より特性変化は 0 を始点に時効期間 t_A の経過ごとに上昇しつつある値へ収束し，収束する値は λ_V および ε_o で決定すると考えられる．この仮説を基に各特性変化の予測式を構築する．まずは収束値をそれぞれ f_R，f_B および f_Y で表し，t_A の経過による収束値へ近づく過程を指数関数で



(a) 延性変化率β_R　(b) 最大引張強度変化率β_B　(c) 降伏強度変化率β_Y

図 1 バナジウム含有率 λ_V と特性変化の関係



(a) 延性変化率β_R　(b) 最大引張強度変化率β_B　(c) 降伏強度変化率β_Y

図 2 時効期間 t_A および予ひずみ ε_o と特性変化の関係

Prediction model for changes in reinforcement properties due to strain ageing (Part2: Prediction model development and verification)

OKAMURA Koshin, Alex SHEGAY, SATO Daiki

表す(式(4), (5), (6)). この収束値 f_R , f_B および f_Y は λ_V および ε_o の 1 次式の組み合わせで決定するのもとして表す(式(7), (8)). ただし図 2(c)に示すように予ひずみ ε_o に対する β_Y の関係はほぼ横ばいで，ある ε_o を境に大きく値を変えることが分かる. そこでこの ε_o をひずみ硬化開始時のひずみ ε_{yh} と仮定し 2 値に分ける形で表す(式(9)). 式(4)から(9)に本報で提案する β_R , β_B および β_Y の予測式を，図 1 の破線部に $\varepsilon_o = 3$ %および $t_A = 1$ 年(材料特性条件に関する実験の条件)の，図 2 の破線部に $\varepsilon_o = 8$ %および $\lambda_V = 0.014$ % (SD345，D19)のときの予測式のプロットを示す.

$$\beta_R = \mathrm{f}_R(\lambda_V, \varepsilon_o) \times \left(1 - e^{-t_A/160}\right) \quad (4)$$

$$\beta_B = \mathrm{f}_B(\lambda_V, \varepsilon_o) \times \left(1 - e^{-t_A/83}\right) \quad (5)$$

$$\beta_Y = \mathrm{f}_Y(\lambda_V, \varepsilon_o) \times \left(1 - e^{-t_A/80}\right) \quad (6)$$

ここで

$$f_R(\lambda_V, \varepsilon_o) = -5.4(0.25 - 280\lambda_V)(-0.015 + 7.5\varepsilon_o) \quad (7)$$

$$f_B(\lambda_V, \varepsilon_o) = 29(0.064 - 210\lambda_V)(-0.0025 + 1.2\varepsilon_o) \quad (8)$$

$$f_Y(\lambda_V, \varepsilon_o) = (0.22 - 350\lambda_V)\varepsilon'_o$$
$$\left(\varepsilon'_o = \begin{cases} 1 & (\varepsilon_o > \varepsilon_{yh}) \\ 1/4 & (\varepsilon_o \le \varepsilon_{yh}) \end{cases}\right) \quad (9)$$

ただし，$-1 \le f_R \le 0$，$f_B \ge 0$，$f_Y \ge 0$と限定する.

4. 構築した予測式の検証

ここまででひずみ時効による特性変化の予測式を構築した. ここでは本報の実験および既往研究の実験の結果に予測式を適応し，その妥当性を検証する.

図 3 に作成した予測式の計算結果(予測値)を縦軸，実験の計測値を横軸で示す. また赤色の散布図部分が本報，黄色の散布図部分が Loporcaro[4]，紫色の散布図部分が Pussegoda[5]の実験結果をそれぞれ示している. また本報と Loporcaro については予測値と計測値の間の決定係数を図中にそれぞれ示している. なお，Loporcaro の実験で使用した $\lambda_V = 0.003$ %，$\varepsilon_o = 12, 18$ %のように予ひずみが極端に大きい鉄筋については傾向から大きく逸脱した値を示したため外れ値とし，本報での分析には用いなかった. 図 3(a)より延性低下の予測式はパンチマークを用いたことによる計測時の誤差が原因であると考えられる差異が生じたため，予測値は計測値を十分に反映しなかった. 一方で図 3(b), (c)より特に強度の上昇については予測値と計測値の差が 10 % 以内であり既往研究も概ね同様の傾向を示しているため，作成した予測モデルが一般的に適応できると考えられる.

5. 結論

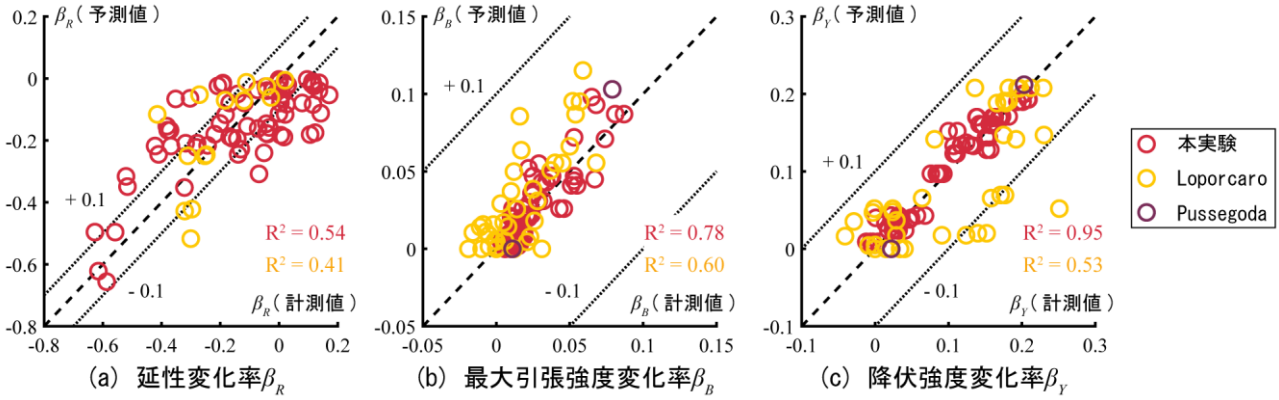
本報では，その 1 で特定したひずみ時効の発生に影響を及ぼすバナジウム含有率 λ_V ，時効期間 t_A および予ひずみ ε_o ついて，それぞれの特性変化の予測式を総合し一般的な予測式を構築した. これは予ひずみが極端に大きい試験体については予測式とは異なる傾向を示すことも確認したが，一方で特に強度の上昇に関して既往研を含め多くの実験結果で予測誤差が 10 % 以内であるため，ひずみ時効による鉄筋の特性変化を一般的に予測できると考えられる.

謝辞

本研究に当たり，東京鐵鋼（株）の各位には貴重なご助言を賜りました. 本研究は JSPS 科研費 22K14315 の助成を受けたものです. また Loporcaro Giuseppe 氏には検証に使用する実験結果の収集の際にご助力を賜りました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

1) 山田哲，竹内篤史，吉敷祥一，渡辺厚：ひずみ時効を受けた鋼材の履歴性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.927-928，2006.
2) 田才晃，山田哲弥，小谷俊介，青山博之：鉄筋コンクリート造曲げ部材の補修後の耐力に関する研究，第七回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.653-656，1985.
3) 武田武信，白鳥英亮，池上皓三，熊倉重典，那須康雄：時効を施した軟鋼の塑性変形挙動，日本機械学会論文集，Vol. 47，No. 418，pp.665-675，1981.
4) Loporcaro, G.: A least invasive method to estimate the residual strain capacity of steel reinforcing bars in earthquake damage buildings, Ph.D thesis. University of Canterbury, 2017.
5) Pussegoda, L.N.: Strain age embrittlement in reinforcing steels, Ph.D thesis. University of Canterbury, 1978.
6) Hundy, B.B.: Accelerated strain ageing of mild steel, Journal of the Iron and Steel Institute, pp. 34-38, 1954.



(a) 延性変化率β_R　(b) 最大引張強度変化率β_B　(c) 降伏強度変化率β_Y

図 3 計測値と予測値の関係

1 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology 1
*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 助教・Ph.D. Assistant Professor, IIR, Tokyo Institute of Technology, Ph.D. *2
*3 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士(工学) Associate Professor, IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. *3